

杨小茹, 苏建强, 郑天凌. 2008 化感作用在赤潮调控中的意义及前景 [J]. 环境科学学报, 28(2): 219–226  
Yang X R, Su J Q, Zheng T L. 2008 The importance and potential application of allelopathy in red-tide control [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 28(2): 219–226

化感作用在赤潮调控中的意义及前景

杨小茹<sup>1, 2, 3</sup>, 苏建强<sup>1, 3</sup>, 郑天凌<sup>1, 2, 3\*</sup>

- 1 厦门大学生命科学学院, 厦门 361005
- 2 国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室, 杭州 310012
- 3 近海海洋环境科学国家重点实验室 (厦门大学), 厦门 361005

收稿日期: 2007-02-12      录用日期: 2007-11-08

**摘要:** 简要概述了化感作用的定义、化感物质的种类及其作用机理, 描述了化感物质在赤潮控制中的作用; 集中综述了水生植物、微藻和细菌所产生的化感物质对赤潮生物的抑制或杀灭作用. 强调了化感作用在赤潮调控中具有重要的意义和广阔应用前景, 对化感作用的深入研究将可能开发出新型的赤潮控制技术.  
**关键词:** 化感作用; 赤潮调控

文章编号: 0253-2468 (2008) 02-219-08      中图分类号: X 171      文献标识码: A

The importance and potential application of allelopathy in red-tide control

YANG Xiaoru<sup>1, 2, 3</sup>, SU Jianqiang<sup>1, 3</sup>, ZHENG Tianling<sup>1, 2, 3\*</sup>

- 1 School of life science, Xiamen University, Xiamen 361005
- 2 Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry, SOA, Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012
- 3 State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen 361005

Received 12 February 2007;      accepted 8 November 2007

**Abstract** This paper summarizes the definition of allelopathy including the categories, functions and mechanisms of allelochemicals in red tide succession, as well as the allelopathic growth inhibition of phytoplankton by different aquatic plants, microalgae and microbes. Considering that allelopathy is one of the mechanisms thought to control red tides, the authors emphasize that future research should mainly focus on the isolation and identification of new allelochemicals and the mechanisms of allelopathy. Intensive study of allelopathy should provide new red tide control methods.  
**Keywords** allelopathy; red-tide control

1 引言 (Introduction)

随着全球经济飞速发展, 人口膨胀、食品短缺、环境恶化和陆地资源衰竭等问题日益突出. 海洋, 尤其是近海对人类有着极其重要的意义. 然而, 20 世纪以来, 伴随着沿海地区人口激增, 工农业的迅速发展, 内湾、河口和沿岸水域出现了严重的有机污染和富营养化, 有害赤潮在中国的发生规模和频

度呈急剧上升趋势, 对我国沿海造成了严重的生态、资源、环境问题和重大的经济损失 (周名江等, 2001; 颜天等, 2001).  
总的来说, 我国有害赤潮的发生有以下趋势: 频率增加, 规模扩大, 新的赤潮藻种不断出现, 有毒赤潮藻种比例上升, 有害赤潮危害程度日益增加 (周名江等, 2001; 梁松等, 2000). 据 2005 年《中国海洋环境质量公报》, 全海域共发现赤潮 82 次, 较

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目 (No. 2008AA09Z408); 国家自然科学基金 (No. 30370276); 国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室开放基金 (No. IMEB200601); 高等学校博士学科点专项科研基金 (No. 20050384002)  
**Supported by** the High-Tech Research and Development Program of China (No. 2008AA09Z408); the National Natural Science Foundation of China (No. 30370276), the Open Fund of Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry (No. IMEB200601) and the Special Fund for PhD Program in University (No. 20050384002)  
**作者简介:** 杨小茹 (1980—), 女, 博士研究生, E-mail: xryang@xmu.edu.cn \* 通讯作者 (责任作者), E-mail: wslwzh@xmu.edu.cn  
**Biography:** YANG Xiaoru (1980—), female, Ph.D. candidate, E-mail: xryang@xmu.edu.cn \* **Corresponding author:** E-mail: wslwzh@xmu.edu.cn  
©1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

上年减少约 15%, 累计发生面积约 27070 km<sup>2</sup>, 与上年基本持平, 但有毒藻类引发的赤潮次数和面积大幅增加。赤潮问题不容忽视, 赤潮造成的各方面的影响已相当严重, 威胁着沿海海洋经济的持续发展和社会的安定。

我国已步入赤潮灾害多发国家行列, 如何有效防治赤潮成为亟待解决的重大问题。目前国内外提出治理藻类爆发的方法多种多样 (包括物理、化学和生物等方法), 但从多角度考虑都不是很理想。因此, 探索有效、经济、无二次污染、生态风险小的控制赤潮发生的方法是当前环境科学的一项重要任务。因此, 及时预报和防治赤潮, 是当前经济建设和环境保护的迫切需要。而化感作用则为赤潮控制提供了一个可能途径。

## 2 化感作用 (Allelopathy)

### 2.1 化感作用的定义

化感作用的发现有着悠久的历史, 早在公元前 3 世纪和公元前 5 世纪古希腊学者 Democritus 和 Theophrastus 就分别提到植物间存在化学物质的相互反应。1937 年德国人 Molisch 提出 “Allelopathy” 一词, 把它用于不同植物包括微生物之间的关系中, 兼指受益和受害 2 个方面 (祝心如, 1994)。Rice 的专著《Allelopathy》第 1 和第 2 版相继于 1974、1984 年问世。可以这样认为: 化感作用是指一种植物或微生物在其生长发育过程中, 通过向环境释放某些化学物质在其周围形成一个微环境区域, 从而抑制或促进该区域内其它植物或微生物生长的现象。20 世纪 60~70 年代以来, 随着化学, 特别是有机化学和植物生理生化、微生物学、生态学、土壤学、农学等学科的相互渗透, 对化感作用 (包括对化感物质的作用机制、分离提取等方面) 的研究有了很大发展, 在合理安排作物布局、作物的间套轮作、杂草防除、新型生物源除草剂的研究开发及植物种群群落演替的研究等方面显示出其潜在的应用价值。化感作用正成为一门多学科交叉的日臻成熟的学科。

### 2.2 化感物质的种类

化感物质种类繁多, 至今已知的化感物质大体上分为 14 类: 水溶性有机酸、直链醇、脂肪族醛和酮; 简单不饱和内酯; 长链脂肪族和多炔; 萜醌、萜醌和复合萜; 简单酚, 苯甲酸及其衍生物; 肉桂酸及其衍生物; 香豆素类; 类黄酮; 单宁; 类萜和甾类化合物; 氨基酸和多肽; 生物碱和甾醇、硫化物和芥子

油苷; 嘌呤和核苷。其中酚类和类萜化合物较为常见 (Rice, 1974、1984)。

### 2.3 化感作用的特点和作用机制

化感作用具有以下特点: ① 化感作用具有选择性和专一性; ② 化感物质对同一植物, 浓度高时产生抑制, 浓度低时有时却能产生促进作用; ③ 化感物质常含有多种成分, 各成分之间会产生复合 (协同) 效应, 使得混合物的活性强于单个成分; ④ 许多化感物质除对植物产生作用外, 还具有多种其它功能, 如冬麦产生的异羟肟酸、酚类化合物和吲哚生物碱等具有抗蚜虫作用 (和丽忠等, 2001)。

化感作用的机制复杂, 包括以下几个方面: ① 影响细胞器膜的透性; ② 影响细胞分裂、生长和亚显微结构; ③ 影响植物激素的水平; ④ 影响对矿物离子的吸收及生物体内的水分平衡; ⑤ 影响酶的功能和活性; ⑥ 影响植物的呼吸作用和光合作用; ⑦ 影响蛋白质合成和基因的表达。综上所述, 植物化感作用首先对膜产生伤害, 通过细胞膜上的靶位点, 将化感物质胁迫的信息传送到细胞内, 从而对激素、离子吸收等产生影响, 而激素、离子吸收以及水分状况等变化必然引起植物细胞分裂、光合作用等的变化, 从而对植物的生长产生抑制作用 (李寿田等, 2001)。

## 3 大型水生植物的抑藻作用 (Allelopathic effect on phytoplankton by aquatic plants)

大型水生植物与藻类的相互抑制作用是广泛存在的。已有文献报道, 大型海藻的水华通常与浮游微藻的水华呈负相关 (Smith *et al.*, 1988; Sfriso *et al.*, 1994), 浮游微藻的生物量经常被大型海藻所抑制, 但对于两者之间负相关的生态作用机制却研究甚少。对大型海藻水华暴发期间浮游微藻的生物量极低这一现象, 前人的解释多集中在氮竞争假说上。Fong 等 (1993) 认为, 藻类对氮吸收的半饱和常数和最大吸收速率的差异决定其在竞争中的优劣。但是, 微藻对氮吸收的最大吸收速率和最大生长速率都显著高于大型海藻 (Pedersen *et al.*, 1996; Hein *et al.*, 1995)。南春容等 (2004) 研究认为, 不论在何种磷浓度下大型海藻孔石莼均能抑制亚心形扁藻的生长。因此, 除了竞争营养盐外, 大型海藻同浮游微藻之间还存在另外的作用机制。

孙文浩等 (1990、1991、1993) 研究了几种大型水生植物对藻类的抑制效应。所有受试植物 (水花生、水浮莲、满江红、紫萍、浮萍、西洋菜和水葫芦)

对雷氏衣藻都有抑制效应,水葫芦的抑制作用最强.国外学者认为,水葫芦可使氧化塘藻类密度减少,这主要是遮光作用所致.但是,经他们多年试验证明,水葫芦能产生抑制藻类的化感物质.无菌培养实验证明这种化学物质不是由根际微生物产生而是由根系本身分泌的.他们从水葫芦培养液中分离出4种有强抑藻作用的物质: $\alpha$ -苯基萘胺、 $\beta$ -苯基萘胺、亚油酸和亚油酸甘油酯.从水葫芦根系丙酮提取物中分离到了3种具有较强抑藻活性的化合物(杨善元等,1992).

何池全等(1999)等发现,石菖蒲根系向水中分泌的化感物质能伤害和清除藻类;石菖蒲培养液能破坏藻细胞的叶绿素.唐萍等(2001)研究表明,太湖水域水花生、菱、金鱼藻和浮萍等受试植物均能在不同程度上减少水体中栅藻细胞数量,促进藻细胞内叶绿素a的破坏与脂质过氧化产物丙二醛(MDA)含量的升高,抑制超氧化物歧化酶(SOD)的活性;同时受试植物的种植水也表现出相似的抑藻效应.贺峰等(2002)研究表明,茺草及其种植水提取物对斜生栅藻具有明显的抑制作用.

对于化感作用早期的工作主要集中于各种植物对藻类抑制现象的观察上,后续的研究则越来越多地集中到从大型水生植物中提取化感物质上. A Iotta等(1990)对香蒲(*Typha latifolia*)的乙醚提取物进行了分析,提取出数种抑制藻类的活性物质,如 $\beta$ -固甾醇,24-亚甲基-4-甲基-7-烯胆烷醇、 $\alpha$ -亚油酸等. Suzuki等(1998)从珊瑚藻(*Lithophyllum* sp.)中分离出褐藻(*Laminaria religiosa*)有抑制作用的化感物质,该物质能抑制 *Laminaria religiosa* 游走孢子的生长,并能够杀死甲藻(*Heterosigma akashiwo* Hada). Nakai等(1999)研究了9种大型水生植物(水盾草、穗状狐尾藻、金鱼藻、荸荠、眼子菜、石龙尾、苦草、埃格草、茺草)对3种藻类(铜绿微囊藻、鱼腥藻、席藻)的化感作用,在受试植物中只有金鱼藻和狐尾藻对3种藻都有抑制作用,且狐尾藻的抑制作用较强. Sabine等(2002)研究表明, *Myriophyllum spicatum* L对多种蓝藻均有抑制作用. A Iansjah等(2005)从裂片石莼 *Ulva fasciata* 分离出对能够杀死赤潮异湾藻 *Heterosigma akashiwo* 的活性物质,并鉴定为 hexadeca-4, 7, 10, 13-tetraenoic acid (HDTA), octadeca-6, 9, 12, 15-tetraenoic acid (ODTA)和  $\alpha$ -linolenic acid 均属于多不饱和脂肪酸.

以上研究结果表明,大型水生植物对藻类的相互抑制作用是广泛存在的,大型水生植物除了能通过光、营养盐的竞争来抑制藻类的生长,同时也能分泌特异性的化感物质来抑制甚至杀死藻类.因此,可以在水体中栽种一些高等植物,包括漂浮植物、沉水植物等,利用植物分泌物与藻类间的相生相克关系去除藻类,达到净化水质、恢复水生生态系统的目的.

#### 4 中草药化感物质的抑藻作用 (Allelopathic effect on phytoplankton by Chinese traditional medicine)

基于化感物质抑藻作用理念,本课题组周立红等研究了黄连、槟榔、板兰根、苦参根、鱼腥草5种中草药浸提液对塔玛亚历山大藻(ATDH01)的抑制作用,同时采用芦荟、海带及沸石粉作为吸附剂研制抑藻剂.结果表明,黄连和槟榔的抑藻效果最好,作用1h的 $EC_{50}$ (半数有效浓度)分别是0.054%和0.074%,随着浸提液加入量的升高抑制作用加强且速度更快;中草药两两联合使用可以增强药物的抑藻能力.以芦荟或海带或沸石粉吸附黄连、海带吸附槟榔的抑藻剂均具有较好的抑藻效果(Zhou et al., 2007).

此外,本课题组还探讨了大蒜粗提液对3种微藻——塔玛亚历山大藻(ATDH01)、锥状斯氏藻(STXM01)、角毛藻等的抑制作用,考察了经不同方法处理的大蒜粗提液及大蒜素对ATDH01的影响.结果表明,大蒜粗提液对ATDH01、STXM01表现出明显的抑制作用,其最小的有效抑制浓度为0.04%,随着浓度的升高抑制效果更加显著;但是,对角毛藻无抑制作用.不同方法处理的大蒜粗提液对ATDH01均具有强抑制作用,加热时间越长其抑制效果越差,作用最有效的时间为7h.大蒜素对ATDH01同样具有很强的抑制作用,浓度为 $2.5 \mu\text{g mL}^{-1}$ 的抑制率就达到90%以上,而且藻受到高浓度药力的影响后无法恢复活动.大蒜来源广泛、价格便宜、作用效果好,其提取物大蒜素也是高效的抑藻剂,因而大蒜是值得深入研究的赤潮治理材料.

#### 5 微藻间的拮抗作用 (Allelopathic effect on phytoplankton by microalgae)

通常认为在同一水体中生活着较丰富的浮游植物种群,在藻华形成过程中,其中某种藻类将成为优势种群,并经常伴随着对其它种群的排除作

用,从而形成该藻水华.这种现象是十分复杂的,种间竞争是重要原因之一.陈德辉等(1999)研究表明,微囊藻和栅藻共培养条件下,微囊藻对栅藻的抑制能力相对而言是栅藻对微囊藻抑制能力的7倍.

研究表明,海洋微藻在生长过程中会不断向周围环境中释放多种代谢产物,如碳水化合物、氨基酸、酶、脂类、维生素、有机磷酸、毒素、挥发性物质以及抑制和促进因子等.这些产物统称为胞外产物(Extracellular products ECP).ECP是海水中化学物质的一个重要来源,它们在海洋生态系统碳循环、微食物环、藻-菌、藻-藻的相互作用中起着重要作用.关于海洋ECP的研究国内外已有不少报道,但研究对象多为细菌(尤其是蓝细菌)、大型藻类、无脊椎动物等.我国海洋微藻ECP的研究工作与国外相比,起步较晚,水平较低,相关报道较少(高亚辉等,2002).

以ECP介导的藻间拮抗作用有可能是藻华种群演替的重要原因之一.有报道,从35种不同微藻培养液的提取物中筛选杀藻化合物,发现*Nodularia harveyana*和*Nostoc insulare*的提取物具有很强的细胞毒性作用和很广的作用谱,其中*Nodularia harveyana*培养液中杀藻物质被鉴定为norhamane(9H-pyrilo(3,4-b)indole),是一种吡咯生物碱;而*Nostoc insulare*培养液中的杀藻物质为4,4'-dihydroxybiphenyl(Volk,2005).如把四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)的培养液经过滤后培养板星藻(*Pediastrum boryanum*),后者不能生长;但如果把培养液用蒸馏水冲稀或煮沸,则会失去抑制作用.这个试验结果表明,栅藻能分泌某种物质来抑制板星藻的生长;小球藻(*Chlorella vulgaris*)能分泌一种抗生素叫小球藻素(Chlorellin)来抑制菱形藻(*Nitzschia frustulum*)的生长.多甲藻(*Peridinium polonicum*)能分泌一种抗生素(glenodin)来抑制栅藻、杜氏藻(*Dunaliella* sp1)等的生长(张冬鹏等,2000).

Pratt(1966)发现,硅藻骨条藻(*Skeletonema costatum*)引起的赤潮和黄藻金黄滑盘藻(*Olisthodiscus luteus*)的赤潮常是交替发生的.骨条藻的滤液有促进金黄滑盘藻增殖的作用,而金黄滑盘藻的滤液却明显地阻碍了骨条藻的增殖,这是硅藻与黄藻间的化感作用所致.张冬鹏等(2000)认为,链状亚历山大藻和锥状施克里普藻的存在可能

对拟菱形藻的生长有促进作用,这种促进作用的机理可能是化感作用.拟菱形藻可能分泌有关的化学物质抑制亚历山大藻和锥状施克里普藻的生长,而亚历山大藻和锥状施克里普藻的存在反而有促进拟菱形藻生长的作用.但是,这种相生相克作用只有在高浓度营养条件下才能表现出来,其原因尚需作进一步的探讨.

## 6 细菌的抑藻作用 (Allelopathic effect on phytoplankton by bacteria)

水生生态系统中,微型藻类与细菌的关系越来越引起人们的重视(Doucette et al., 1995, 1998, 郑天凌等, 2003).细菌对藻类的影响主要体现在,一方面细菌吸收藻类产生的有机物质,并为藻类的生长提供营养盐和必要的生长因子,从而调节藻类的生长;另一方面,细菌也可以通过直接或间接的作用抑制藻类的生长,甚至裂解藻细胞,从而表现为杀藻效应.

Middelboe等(1995)在研究富营养化湖水发生的水华时发现,随着水华的发展,水体中细菌的细胞外分泌物的量增加1倍以上,而细菌胞外酶的活性也显著增强.这表明,细菌可能是通过细胞外分泌物和特殊的胞外酶来杀藻的.假单胞菌*Pseudomonas*(Dakham, 1993)、芽孢杆菌*Bacillus*(Rein, 1974)、黄杆菌*Flavobacterium* sp和螺旋菌*Sapropira* sp(Fukami et al., 1991)可分泌有毒物质释放于水环境中,抑制某些藻类(如甲藻和硅藻等)的生长.Lovejoy等(1998)在澳大利亚分离到1株*Pseudoalteromonas*,该菌在3h内能导致赤潮藻*Gymnodinium catenatum*、*Chattonella marina*和*Heterosigma akashiwo*细胞裂解;进一步研究表明,该菌是通过向海水培养基释放活性物质而起作用的.Doucette(1999)分离到1株细菌4I-DBG2能产生一种溶解性杀藻复合物从而有效地杀死*Gymnodinium breve*.

已知铜绿假单胞菌*Pseudomonas aeruginosa*可产生大量的抗生素类物质,如扩散性吩嗪色素物质,对其它细菌和藻类的生长都有抑制作用(Middelboe et al., 1995).最近有研究者从这种细菌中提取了几种特异性杀藻的抗生素物质,其中有些物质,如1-羟基吩嗪和氧氯菌素,能强烈抑制蓝藻和绿藻的生长.而假单胞菌*Pseudomonas stutzeri*可分泌高活性的杀藻物质(Dakham, 1989),这些物质是已知的对藻类杀伤力最强的细菌产物.它可杀死

顽固的赤潮藻类 *Chattonella antiqua*。Imai等(1995)在日本 Hiroshima海湾发现 4株 *Alteromonas* 属的细菌也可以杀死 *Chattonella antiqua*。从 *Pseudomonas stutzeri*中提取出的“甲藻生长抑制剂(Dinoflagellate Growth Inhibitor DGI)”活性较高,且毒性较稳定(4℃条件下保存 3个月保持不变),并且对鱼类无害,是比较理想的杀藻物质(Hayashida 1991);关于杀藻机理,一般认为 DGI通过作用于生理过程,如阻断呼吸链、抑制细胞壁合成、抑制孢子的形成等方面,以达到抑制藻细胞生长或杀灭藻细胞的结果。

Lee等(2000)从 1株能杀死硅藻(*Skeletonema costatum*)的 *Pseudoalteromonas* sp. A28培养液中提取并纯化到一种蛋白酶,该酶具有杀藻活性;进一步研究表明,该酶分子量大约 50kDa 其最适 pH 和温度分别为 8.8和 30℃。袁峻峰等(1999)从绿裸藻(*Euglena viridis*)水华中分离的优势菌种之一中性柠檬酸菌(*Citrobacter intermedius*)的分泌物对斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)、粉核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)、羊角月牙藻(*Selenastrum capricornutum*)、水华鱼腥藻(*Anabaena flos-aquae*)和易变鱼腥藻(*Anabaena variabilis*)的生长有促进作用;而对银灰平裂藻(*Merismopedia glauca*)、莱茵衣藻(*Chlamydomonas reinhardtii*)和铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)的生长具有抑制作用。中性柠檬酸菌的胞外分泌物能促进粉核小球藻细胞个体的长大,对其它藻类主要是影响细胞的大小。Kodani等(2002)从日本东京 Shinobazu池塘中分离到 12株具有杀藻活性的细菌,其中 9株属于 *Pseudoalteromonas* sp.,其中 K44-1的甲醇提取物具有明显的杀藻活性,进一步从中提取到 1-甲基- $\beta$ -吡啶,当浓度在  $30\mu\text{g}\cdot\text{disc}^{-1}$ 时均能抑制几种蓝藻的生长。

此外,本实验室研究表明,从厦门西海域分离到的几株海洋细菌,在一定条件下具有显著的抑制塔玛亚历山大藻生长和产毒的能力,但其机制尚未探明,化感物质可能起了很大的作用(郑天凌等,2002;苏建强等,2003)。本实验室还成功地对塔玛亚历山大藻培养液进行除菌,获得其无菌培养体系(Su JQ et al., 2006),并以此体系从东海赤潮区分离并筛选到 8株能杀死塔玛亚历山大藻的海洋细菌;这是有关塔玛亚历山大藻杀藻细菌的首次报导,这些细菌均是通过其胞外分泌物进行杀藻的。目前我们已经对其中活性最强的 1株假交替单胞菌属(*Pseudoalteromonas*) SP48的胞外分泌物作了初步

研究,发现其具有很好的热稳定性,且极性较大,对其杀藻活性物质的分离鉴定工作正在进行中。

由于细菌和藻类之间这些错综复杂的关系,使人们在研究浮游植物水华和赤潮的发生、发展、衰落与消亡机理时,不能不考虑细菌的重要性,其中细菌杀藻现象更为利用微生物防治赤潮提供了可能的途径。

## 7 化感物质在赤潮控制中的应用前景 (Potential application of allelochemicals in red tide control)

赤潮灾害的防治是当今海洋环境科学家的首要任务。目前藻类控制技术主要有以下几个方面。

①物理方法:主要有隔离法、超声波法、微滤机除藻、活性炭吸附、气浮法等。但是,物理法对低密度或底层藻类的灭杀效果不好、费用高,并且难于大面积使用。④生物法:主要有微生物抑藻(郑天凌等,2003)、动物捕食法等(刁洪成等,1998;王志勇,1996)。其优点是方法简单,适于在养殖水域使用,但当水体中藻密度过高时水体内溶解氧低,动物不能生长;同时藻毒素能危及动物的生命或者在动物体内蓄积,从而危害人体健康。④化学法(俞志明等,1993;曹西华等,2003,2006):应用化学药品直接杀死有害藻类。该法见效快、易操作,但所用化学药品在生态系统中存留时间长会带来生态危害,同时易在食物链中通过生物放大作用积累,给人类带来危害。

由于现有藻类控制技术存在的固有缺陷,人们对新型高效、生态安全的藻类控制技术的探索一直没有停止。化感作用和化感物质的发现为开发藻类控制技术提供了新方向。目前对陆生植物的化感作用研究较多,而对水生系统中的化感作用则研究较少;然而,随着人们对水华危害认识的深入,已有科学家开始致力于抑藻/杀藻化感物质的研究。如前所述,对抑藻/杀藻化感物质的研究主要集中于大型水生植物及细菌,且已经取得一定的成果。

综上所述,化感作用的研究在赤潮控制中具有重要的意义和发展前景。在湖泊、养殖塘、内湾环境,通过种植某些具有杀藻活性的水生植物,一方面可以通过对营养盐的吸收利用改善其富营养状况,一方面可以通过化感作用防止水华的产生。而在海洋环境中,利用微生物,如细菌的抑藻/杀藻作用使海洋环境保持长期、可靠的生态平衡,从而达到防治赤潮的目的。

赤潮控制中的化感作用研究正处于迅猛发展

的时期,并已经取得一定成果,但在很多方面尚无突破性进展.在今后的研究中,一方面应该致力于新的化感物质的进一步分离、鉴定和提纯,开发出具有真正应用价值的化感物质,并在此基础上开发出无污染的新型杀藻剂、抑藻剂等;另一方面,应从分子水平揭示化感物质作用的机制,探明化感物质基因,利用基因工程手段定向构建高效抑藻菌或活性物质高产菌,并应用到赤潮的实际防治中.同时,必须研究化感物质在自然界中的归趋与生态毒性,掌握其在自然界的迁移转化规律和生态毒性,以避免生态危机.



责任作者简介:郑天凌 (1955—),博士,厦门大学微生物教授、博士生导师.厦门大学生命学院环境微生物研究所所长;国家自然科学基金委学科评审组成员(8th)和国际合作项目评审专家;国家科技部科学技术奖评审专家(2006—);国家“973”计划项目“中国东部陆架边缘海海域物理环境演变

及其环境效应”(2005CB422300)专家组成员;国际SCOR/IOC赤潮专家组中国委员会委员,中国海洋学会青年工作委员会副主任;中国微生物学会理事,中国环境微生物学专业委员会副主任;厦门大学“生物科学”学术委员会委员;《微生物学报》、《海洋学研究》、《地球科学进展》、《应用与环境生物学报》、《中国农业生态学报》编委.合著了《环境微生物学》和《环境生物技术》教材2部.在国内外重要刊物发表学术论文120多篇;多项成果获奖.通讯地址:厦门大学170#楼,邮政编码:361005,联系电话:0592-2183217,13599919198.

## References

Alamshah M A, Hirao S, Ishibashi F, *et al*. 2005. Isolation and structure determination of algicidal compounds from *Uba fasciata* [J]. *Bioscience, Biotechnology and Agrochemistry*, 69(11): 2186—2192

Aliotta G, Greca N D, Monaco P, *et al*. 1990. In vivo algal growth inhibition by phytochemicals of *Typha latifolia* [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 16: 2637—2646

Cao X H, Yu Z M. 2003. Extinguishment of harmful algae by organo-clay [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14(7): 1169—1172 (in Chinese)

Cao X H, Song X X, Yu Z M, *et al*. 2006. Mechanisms of removing red tide organisms by organo-clays [J]. *Environmental Science*, 27(8): 1522—1530 (in Chinese)

Chen D H, Liu Y D, Yuan J F, *et al*. 1999. Experiments of mixed culture and calculation of competitive parameters between *M. aeruginosa*

(Cyanobacteria) and *Scenedesmus* (Green algae) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 19(6): 908—913 (in Chinese)

Dakham A. 1989. Stimulatory and inhibitory effects of *Pseudomonas* on the growth of algae [J]. *CanTech Rep Fish AquatSci*, 1714: 46—51

Dakham A. 1993. Isolation and identification of anti-algal substances produced by *Pseudomonas aeruginosa* [J]. *Journal of Applied Phycology*, 5: 297—306

Diao H C, Jiang J H. 1998. The harm, prevention and control of red tide [J]. *Shandong Environment*, 5: 52—53 (in Chinese)

Doucette G J. 1995. Assessment of the interaction of prokaryotic cells with harmful algal species [A]. //Lasus P, Arzul G, Erard E, *et al*. *Harmful Marine Algal Blooms* [C]. Paris: Lavoisier Science Publ., 385—394

Doucette G J. 1999. Algicidal bacteria active against *Gymnodinium breve* (Dinophyceae). I. Bacterial isolation and characterization of killing activity [J]. *Journal of Phycology*, 35: 1447—1454

Docuette G J, Kodama M, Gallacher S. 1998. Bacterial interaction with harmful algal bloom species. Bloom ecology, toxigenesis and cytology [A]. //Anderson D M, Cembella A D, Hallegraeff G M. *Physiological Ecology of Harmful Algal Blooms*. NATO ASI Series Vol. G41 [C]. Springer-verlag Berlin Heidelberg: 619—647

Fong P, Donohoe R M, Zedler J B. 1993. Competition with macroalgae and benthic cyanobacterial limits phytoplankton abundance in experimental microcosms [J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 100: 97—102

Fukami K, Yuzawa A, Nishijima T, *et al*. 1991. Isolation and properties of a bacterium inhibiting the growth of *Gymnodinium nagasakiense* [J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 58: 1073—1077

Gao Y H, Jing H M, Huang D Q, *et al*. 2002. Advances in studies on the extracellular products of marine microalgae [J]. *Marine Sciences*, 26(3): 35—38 (in Chinese)

Hallegraeff G M. 1993. A review of harmful algal blooms and their apparent global increase [J]. *Phycologia*, 32: 79—99

Hayashida S. 1991. Isolation of anti-algal *Pseudomonas stutzeri* strains and their lethal activity for *Chattonella antiqua* [J]. *Agric Biol Chem*, 55(3): 787—790

He C Q, Ye J X. 1999. Inhibitory effects of *Acorus tatarinowii* on algae growth [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 19(5): 754—758 (in Chinese)

He F, Wu Z B, Qiu D R. 2002. Allelopathic effects between aquatic plant (*Potamogeton crispus*) and algae (*Scenedesmus obliquus*) in the enclosures at Donghu Lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 26(4): 421—424 (in Chinese)

He L Z, Chen J Y, Dong B S, *et al*. 2001. Briefly research on allelopathy in China [J]. *Yunnan Agricultural Science and Technology*, (1): 37—41 (in Chinese)

Hein M, Pedersen M F, Sand-Jensen K. 1995. Size-dependent nitrogen uptake in micro- and macroalgae [J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 118: 247—253

Imai I, Ishii Y, Sakaguchi K, *et al*. 1995. Algicidal marine bacteria isolated from northern Hiroshima Bay, Japan [J]. *Fisheries Science*, 61(4): 628—636

- Kodani S, Inoto A, Mitsutani A, *et al* 2002 Isolation and identification of the anti-algal compound, hamane (1-methyl- $\beta$ -carboline), produced by the algicidal bacterium, *Pseudomonas* sp. K44-1 [J]. *Journal of Applied Phycology*, 14 (2): 109—114
- Lee S, Kab J, Takiguchi N, *et al* 2000. Involvement of an extracellular protease in algicidal activity of the marine bacterium *Pseudoalteromonas* sp. Strain A28 [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 66(10): 4334—4339
- Li S T, Zhou J M, Wang H Y, *et al* 2001 Allelopathic mechanism of plants [J]. *Rural Eco-Environment*, 17(4): 52—55 (in Chinese)
- Liang S Q, Han H L, Qi Y Z 2000 Problem on the red tide in coastal China sea [J]. *Ecologic Science*, 19 (4): 44—50 (in Chinese)
- Lovejoy C, Bowman J P, Hallegraeff G M. 1998. Algicidal effects of a novel marine *Pseudoalteromonas* isolate (Class *Proteobacteria*, Gamma Subdivision) on harmful algal bloom species of the Genera *Chattonella*, *Gymnodinium*, and *Heterosigma* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 64(8): 2806—2813
- Middelboe M, Sndergaard M, Letarte Y, *et al* 1995 Attached and free-living bacteria: Production and polymer hydrolysis during a diatom bloom [J]. *Microb Ecol*, 29: 231—248
- Nakai S, Inoue Y, Hosomi M, *et al* 1999. Growth inhibition of blue-green algae by allelopathic effects of macrophytes [J]. *Wat Sci Tech*, 39(8): 47—53
- Nan C R, Dong S L. 2004. A preliminary study of the suppression of phytoplankton by *Ulva pertusa*: the effects of algal density and phosphorus concentration [J]. *Journal of Ocean University of China*, 34(1): 48—54 (in Chinese)
- Pedersen M F, Borum J. 1996. Nutrient control of algal growth in estuarine waters: Nutrient limitation and the importance of nitrogen requirements and nitrogen storage among phytoplankton and species of macroalgae [J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 142: 261—272
- Pratt C M. 1966. Competition between *Skeletonema costatum* and *Olisthodiscus luteus* in Narragansett Bay and in culture [J]. *Limnol Oceanogr*, 11: 447
- Rein R L. 1974. The characterization of a *Bacillus* capable of blue-green bactericidal activity [J]. *Can J Microbiol*, 20: 981—986
- Rice E L. 1974. Allelopathy [M]. New York: Academic Press
- Rice E L. 1984. Allelopathy (2nd Ed) [M]. New York: Academic Press
- Sabine K, Andreas N. 2002. Allelopathic growth inhibition of selected phytoplankton species by submerged macrophytes [J]. *Journal of Phycology*, 38: 862—871
- Sfriso A, Pavoni B. 1994. Macroalgae and phytoplankton competition in the central Venice lagoon [J]. *Environ Tech*, 15: 12—14
- Smith D W, Home A J. 1988. Experimental measurement of resource competition between planktonic microalgae and macroalgae (seaweeds) in mesocosms simulating the San Francisco Bay—Estuary, California [J]. *Hydrobiologia*, 159: 259—268
- Su J Q, Yang X R, Zheng T L, *et al* 2006. An efficient method to obtain axenic cultures of *Alexandrium tamarense*—a PSP-producing dinoflagellate [J]. *Journal of Microbiological Methods*, doi:10.1016/j.jm.2006.07.005
- Su J Q, Zheng T L, Hu Z, *et al* 2003. Effects of marine bacteria on the growth and toxin production of red-tide algae under different pH and salinities [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14 (7): 1161—1164 (in Chinese)
- Sun W H. 1991. Bioassay of allelopathic compounds of *Eidhonia crassipes* on algae [J]. *Plant Physiology Communication*, 27(6): 433—436 (in Chinese)
- Sun W H, Wu H M, Tang C S, *et al* 1993. Allelochemicals from root exudates of water hyacinth (*Eidhonia crassipes*) [J]. *Acta Phytophysiological Sinica*, 19(1): 92—96 (in Chinese)
- Sun W H, Yu Z W, Tai G H, *et al* 1990. Sterilized culture of water hyacinth and its application in the study of allelopathic effect on algae [J]. *Acta Phytophysiological Sinica*, 16 (3): 301—305 (in Chinese)
- Suzuki Y, Takabayashi T, Kawaguchi T, *et al* 1998. Isolation of an allelopathic substance from the crustose coralline algae *Lithophyllum* spp., and its effect on the brown alga *Laminaria religiosa Miyabe* (Phaeophyta) [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 225: 69—77
- Tang P, Wu G R, Lu C M, *et al* 2001. Allelopathic effects of several higher aquatic plants in Taihu Lake on *Scenedesmus arcuatus* Lemm [J]. *Rural Eco-Environment*, 17(3): 42—44 (in Chinese)
- Volk R B. 2005. Screening of microalgal culture media for the presence of algicidal compounds and isolation and identification of two bioactive metabolites excreted by the cyanobacteria *Nostoc insulare* and *Nalularia harveyana* [J]. *Journal of Applied Phycology*, 17 (4): 339—347
- Wang Z Y. 1996. Biological control of red tide in the coast and harbor waters [J]. *Traffic Environmental Protection*, 17(3): 40—42 (in Chinese)
- Yan T, Zhou M J, Zou J Z, *et al* 2001. Preliminary studies on red tide formation mechanism in Hong Kong and Pearl River Estuary [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 21(10): 1634—1641 (in Chinese)
- Yang S Y, Yu Z W, Sun W H, *et al* 1992. Isolation and identification of anti-algal compounds from root system of water hyacinth [J]. *Acta Phytophysiological Sinica*, 18(4): 399—402 (in Chinese)
- Yu Z M, Zou J Z, Ma X N. 1993. The chemical means of controlling red tides [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 24(3): 314—318 (in Chinese)
- Yuan J F, Meng Z F, Chen D H, *et al* 1999. Allelopathy of citrobacter intermediate on growth of several common algae [J]. *Freshwater Fisheries*, 29(4): 12—15 (in Chinese)
- Zhang D P, Wu B W. 2000. Studies on response of red tide algae on temperature, nitrogen, phosphorus and the algal interactions [J]. *Journal of Jinan University (Natural Science)*, 21(5): 82—87 (in Chinese)
- Zheng T L, Su J Q. 2003. The role of marine bacteria in the occurrence and decline of red-tide [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 27 (3): 291—295 (in Chinese)
- Zheng T L, Su J Q, Maskou K. 2005. Microbial modulation in the growth and toxin production of *Alexandrium tamarense* [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 51: 1018—1025

- Zheng T L, Tian Y, Su J Q, *et al*. 2002. Study on the ecological relationship between a red-tide causative alga and three strains of bacteria isolated from Ximen Harbor[ J]. *Acta Ecologica Sinica* 22( 12): 2063—2070 ( in Chinese)
- Zhou L H, Zheng T L, Wang X, *et al*. 2007. Effect of five Chinese traditional medicines on the biological activity of a red-tide causing alga-*Alexandrium tamarense*. *Harmful Algae* doi: 10. 1016/j. hal. 2006. 10. 002
- Zhou M J, Zhu M Y, Zhang J. 2001. Status of harmful algal blooms and related research activities in China[ J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences* 13( 2): 54—59 ( in Chinese)
- Zhu X R. 1994. The development and research field of chemical ecology [ J]. *Acta Ecologica Sinica* 14(Sup): 131—137 ( in Chinese)

## 中文参考文献:

- 曹西华, 俞志明. 2003. 有机改性粘土去除有害赤潮藻的研究 [ J]. *应用生态学报*, 14( 7): 1169—1172
- 曹西华, 宋秀贤, 俞志明, 等. 2006. 有机改性粘土去除赤潮生物的机制研究 [ J]. *环境科学*, 27( 8): 1522—1530
- 陈德辉, 刘永定, 袁峻峰, 等. 1999. 微囊藻和栅藻共培养实验及其竞争参数的计算 [ J]. *生态学报*, 19( 6): 908—913
- 刁洪成, 江建华. 1998. 浅谈赤潮的危害及防治 [ J]. *山东环境*, 5: 52—53
- 高亚辉, 荆红梅, 黄德强, 等. 2002. 海洋微藻胞外产物研究进展 [ J]. *海洋科学*, 26( 3): 35—38
- 何池全, 叶居新. 1999. 石菖蒲 (*Acorus tatarinowii*) 克藻效应的研究 [ J]. *生态学报*, 19( 5): 754—758
- 贺锋, 吴振斌, 邱东茹. 2002. 东湖围隔中菹草与藻类生化他感作用的初步研究 [ J]. *水生生物学报*, 26( 4): 421—424
- 和丽忠, 陈锦玉, 董宝生, 等. 2001. 国内植物化感作用研究概况 [ J]. *云南农业科技*, ( 1): 37—41
- 李寿田, 周健民, 王火焰, 等. 2001. 植物化感作用机理的研究进展 [ J]. *农村生态环境*, 17( 4): 52—55
- 梁松, 钱宏林, 齐雨藻. 2000. 中国沿海的赤潮问题 [ J]. *生态科学*, 19( 4): 44—50
- 南春容, 董双林. 2004. 大型海藻孔石莼抑制浮游微藻生长的原因初探——种群密度及磷浓度的作用 [ J]. *中国海洋大学学报*, 34( 1): 48—54
- 苏建强, 郑天凌, 胡忠, 等. 2003. 不同 pH 和盐度下海洋细菌对赤潮藻生长和产毒的影响 [ J]. *应用生态学报*, 14( 7): 1161—1164
- 孙文浩, 吴厚铭, 唐崇实, 等. 1993. 凤眼莲根系分泌物中的克藻化合物 [ J]. *植物生理学报*, 19( 1): 92—96
- 孙文浩. 1991. 凤眼莲克藻化合物的生物检测 [ J]. *植物生理学通讯*, 27( 6): 433—436
- 孙文浩, 俞子文, 邵根福, 等. 1990. 凤眼莲无菌培养及其克藻效应 [ J]. *植物生理学报*, 16( 3): 301—305
- 唐萍, 吴国荣, 陆长梅, 等. 2001. 太湖水域几种高等水生植物的克藻效应 [ J]. *农村生态环境*, 17( 3): 42—44
- 王志勇. 1996. 近岸及港湾水体赤潮的生物治理 [ J]. *交通环保*, 17( 3): 40—42
- 颜天, 周名江, 邹景忠, 等. 2001. 香港及珠江口海域有害赤潮发生机制初步探讨 [ J]. *生态学报*, 21( 10): 1634—1641
- 杨善元, 俞子文, 孙文浩, 等. 1992. 凤眼莲根系中抑藻类物质分离与鉴定 [ J]. *植物生理学报*, 18( 4): 399—402
- 俞志明, 邹景忠, 马锡年. 1993. 治理赤潮的化学方法 [ J]. *海洋与湖沼*, 24( 3): 314—318
- 袁峻峰, 孟智芳, 陈德辉, 等. 1999. 中性柠檬酸菌对几种常见藻类生长的他感作用 [ J]. *淡水渔业*, 29( 4): 12—15
- 张冬鹏, 武宝王. 2000. 几种赤潮藻对温度、氮、磷的响应及藻间相互作用的研究 [ J]. *暨南大学学报 ( 自然科学版 )*, 21( 5): 82—87
- 郑天凌, 苏建强. 2003. 海洋微生物在赤潮生消过程中的作用 [ J]. *水生生物学报*, 27( 3): 291—295
- 郑天凌, 田蕴, 苏建强, 等. 2002. 赤潮生物塔玛亚历山大藻与厦门海域几种细菌的生态关系 [ J]. *生态学报*, 22( 12): 2063—2070
- 周名江, 朱明远, 张经. 2001. 中国赤潮的发生趋势和研究进展 [ J]. *生命科学*, 13( 2): 54—59
- 祝心如. 1994. 化学生态学的发展和研究领域 [ J]. *生态学报*, 14( 增 ): 131—137